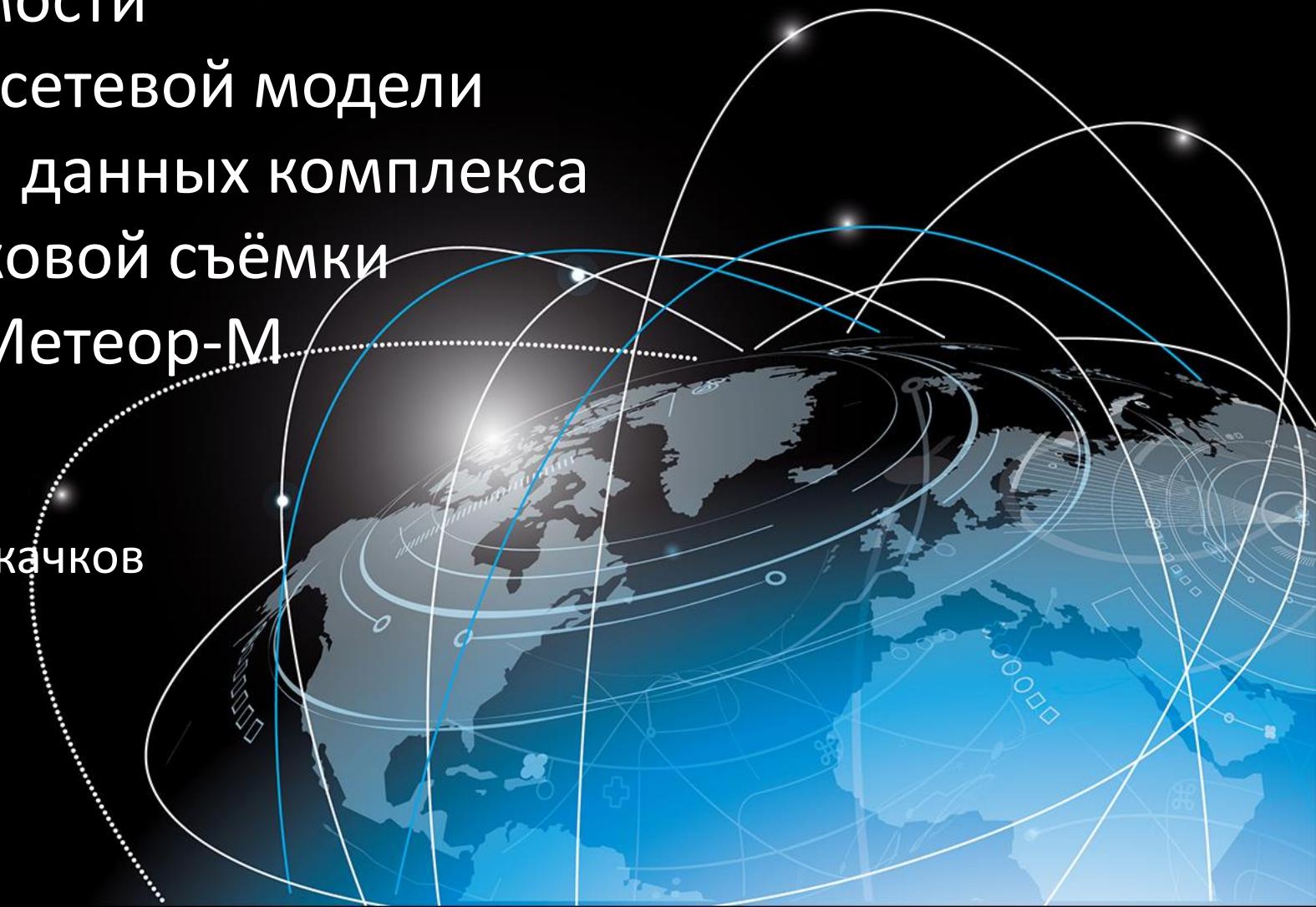


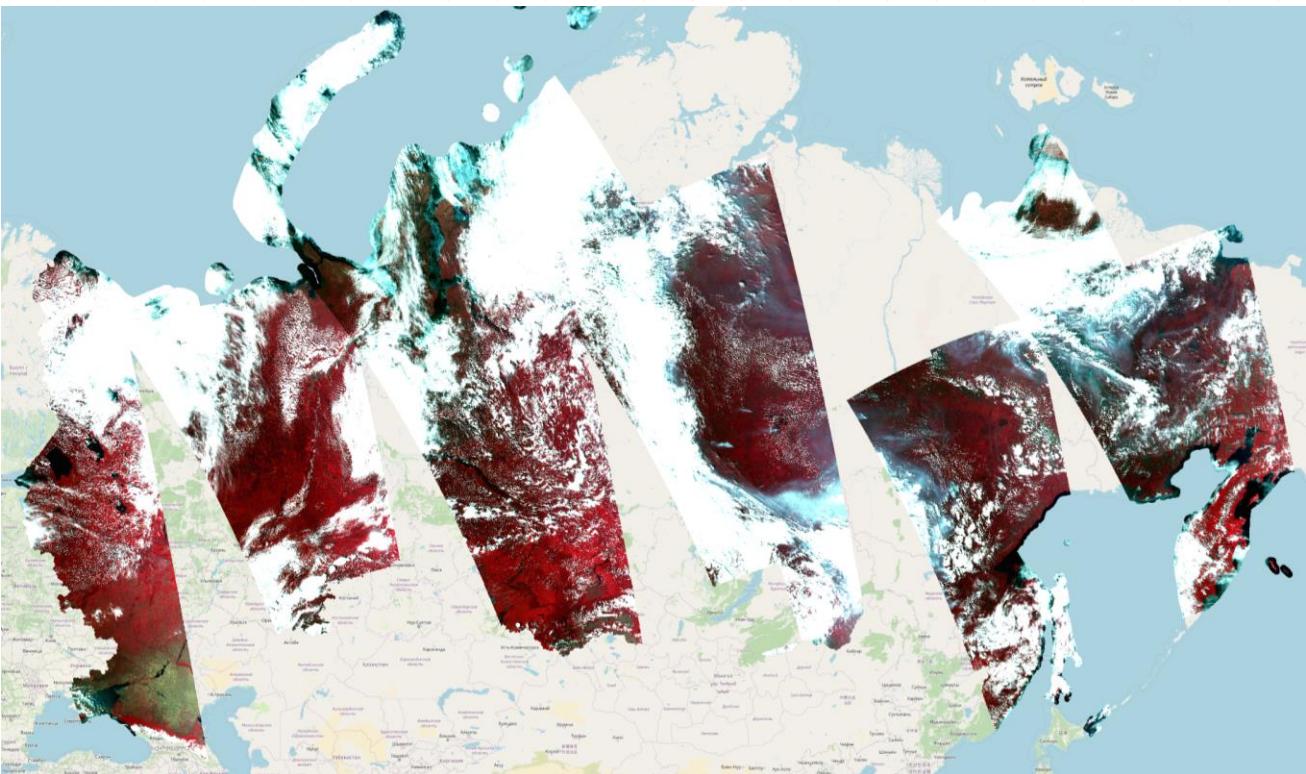
Исследование применимости  
мультимодальной нейросетевой модели  
*TerraMind* для обработки данных комплекса  
многозональной спутниковой съёмки  
космического аппарата Метеор-М

А.И.Васильев, А.А.Акимов, А.М.Скачков



# Актуальность задачи сегментации

- **Оперативные задачи ДЗЗ:**  
суточные мозаики РФ,  
мониторинг паводков/ледовой  
обстановки/пожаров.
- **Ключевой этап предобработки:**  
облачная маска нужна для отбора  
сцен, радиометрической  
нормализации и бесшовного  
слияния; водная маска — для  
тематических продуктов



Суточная мозаика «Метеор-М» № 2-4, на  
территорию РФ (13.07.2025)

# Цели и задачи исследования

**Цель** - оценить применимость TerraMind к мозаикам КМСС («Метеор-М») для сегментации **облаков и воды** в потоке суточной сборки мозаик.

## Задачи

- Сопоставить результат работы **TerraMind** и **ResNet** (КМСС)
- Исследовать влияние **масштаба тайла** и **нормализации** на качество.
- Разработать и верифицировать ансамбль **TerraMind–ResNet**; сформулировать **рекомендации по применимости**.

# Проблемы

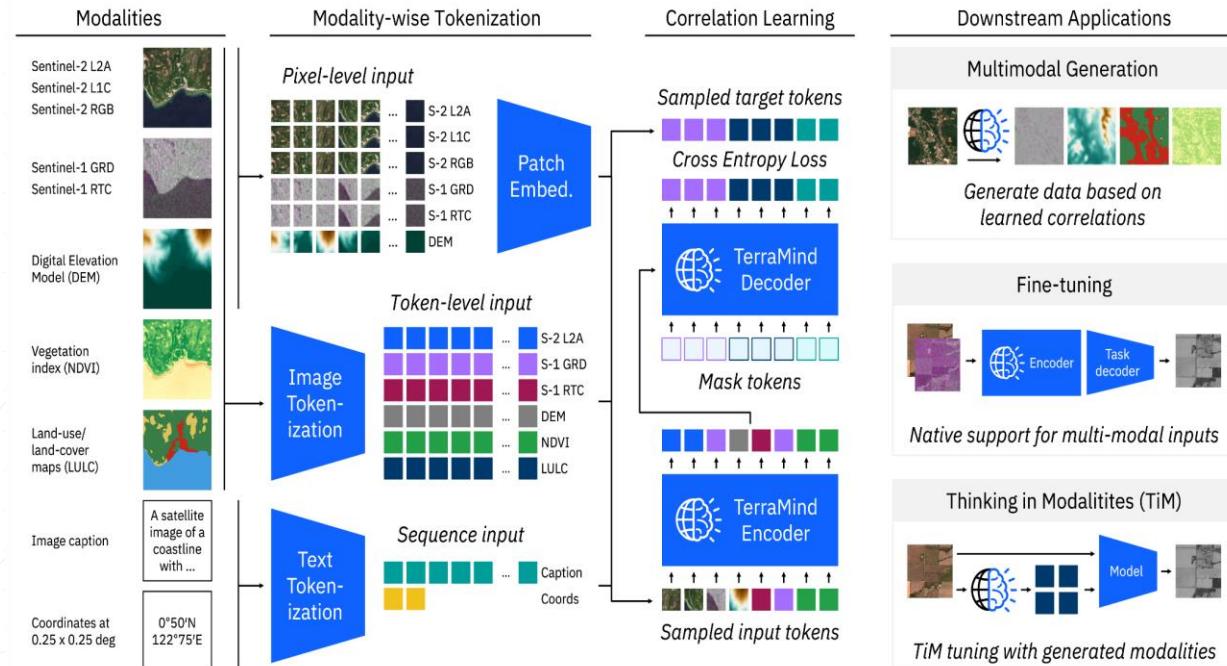
- **Доменный сдвиг:** TerraMind обучалась на мультимодальных данных с доминированием Sentinel-1/2 (напр., Sen1Floods11); спектр и разрешение КМСС иные → нужна проверка переносимости.
- **Вариативность данных:** сезоны; снег/лёд; тени облаков; блики воды; тонкая/перистая облачность.
- **Разметка:** ограниченный и неоднородный объём; дисбаланс классов («облака»/«вода»).
- **Условия исследования:** фиксированный конвейер мозаик; рассматриваем только классы «облака» и «вода»; TerraMind используется без дообучения на КМСС.

# СРАВНЕНИЕ КА «Метеор-М» № 2-4 И КА Sentinel-2

Параметр	КМСС («Метеор-М»)	Sentinel-2 (MSI)	Последствие для переноса
<b>Спектральные каналы</b>	NIR, Red, Green	Nir, Red, Green Coastal aerosol, Blue, Green, Red, Red Edge 1, Red Edge 2, Red Edge 3, NIR (широкий), NIR (узкий), Water Vapour, Cirrus, SWIR 1, SWIR 2	Меньше признаков → ниже разделимость классов
<b>Разрешение (GSD)</b>	60 м	10/20/60 м (в зависимости от канала)	Важен подбор размера тайла и ресемблинга
<b>Радиометрия/битность</b>	Иная шкала DN/калибровка	Стабильная калибровка	Нужна нормализация
<b>Индексы/вспом. каналы</b>	NDVI возможен, NDWI/облачные индексы ограничены	NDVI/NDWI и др. доступны	Использовать прокси-признаки или каскад (грубый→уточняющий)

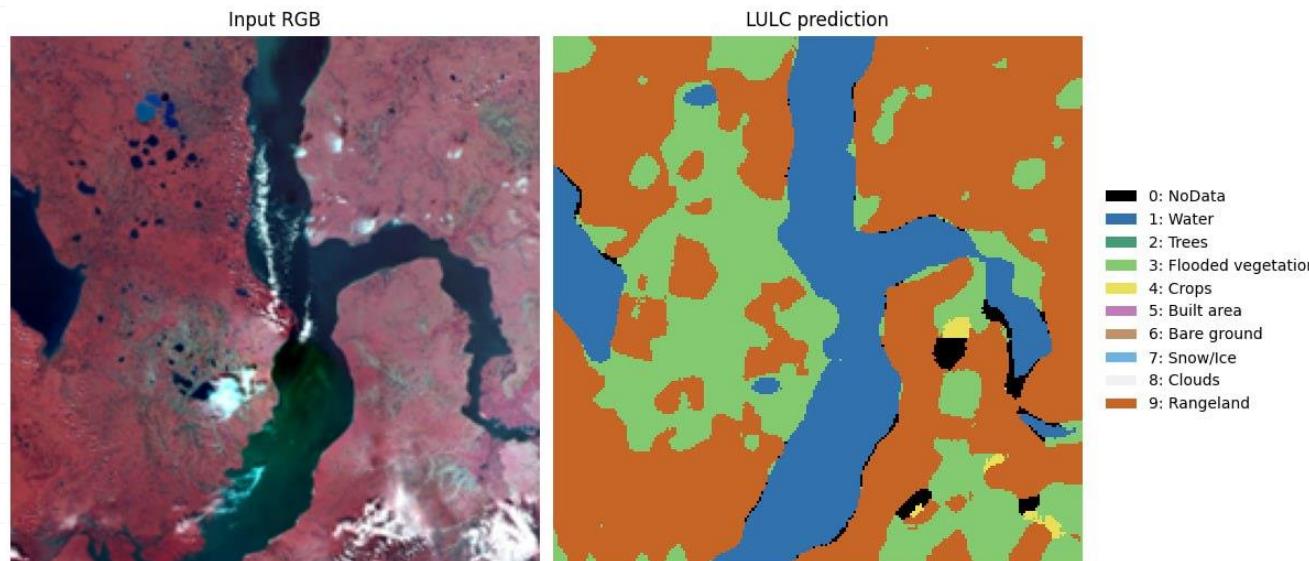
# Архитектура Terramind

- **Класс модели:** any-to-any генеративная мультимодальная foundation-модель для ДЗЗ; несколько версий.
- **Ключевая идея:** двухмасштабное предобучение (пиксели + токены) → лучшая переносимость между задачами/модальностями.
- **Модальности предобучения:** Sentinel-2 (оптика), Sentinel-1 (радар), DEM, NDVI, LULC, текст, координаты.
- **Особенность:** Thinking-in-Modalities (TiM) — дозаполнение недостающих модальностей при fine-tune/инфереенсе.
- **Наш режим:** zero-shot на КМСС, без дообучения; вход — G/R/NIR-тайлы, единая нормализация; пороги — по валидации на КМСС.



# Применение TerraMind к данным КА «Метеор-М» № 2-4

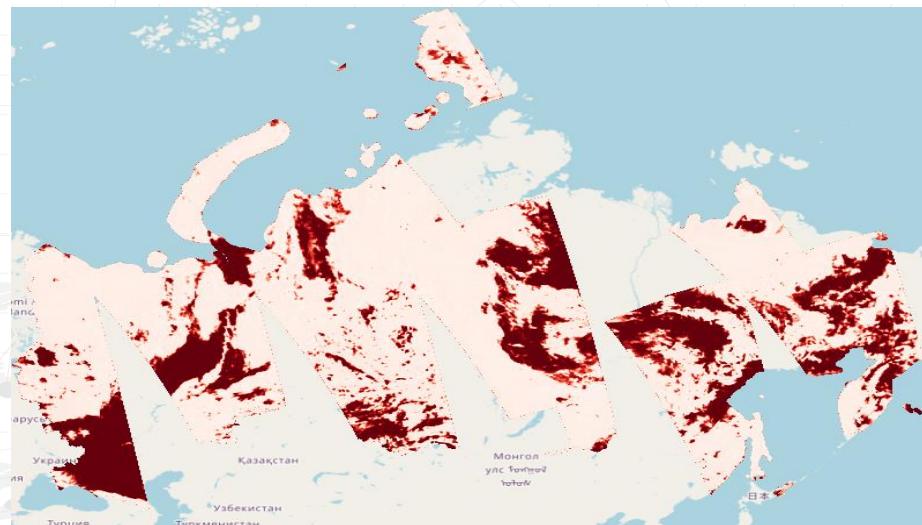
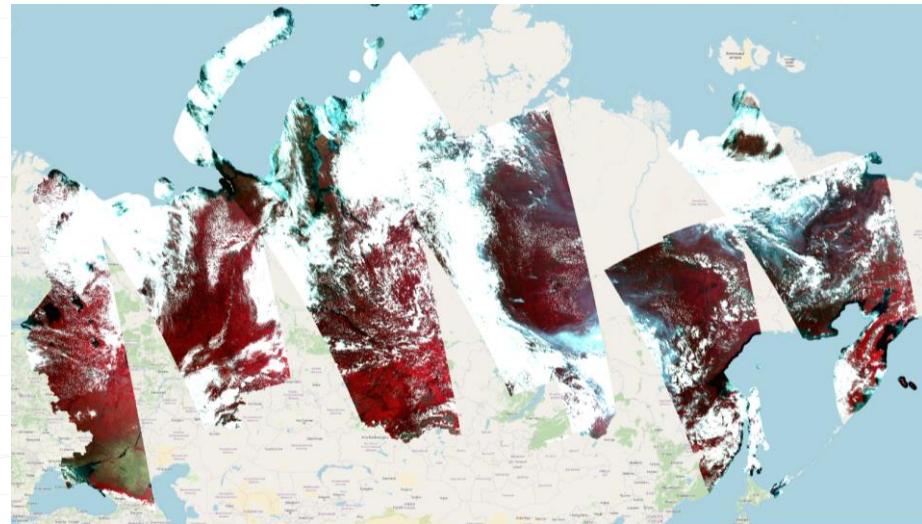
- Условия:** zero-shot, без дообучения и радиометрической нормализации;  
**Наблюдение:** высокая полнота, но много FP; сильная зависимость от размера тайла.
- Нестабильность:** метрики «плавают» между сценами (сезон, освещённость, угол Солнца).
- Типичные ошибки:** перистые/тонкие облака, облачные тени; блики на воде; снег/лёд путаются с облаками/водой.
- Вывод:** подходит как грубый детектор, но без нормализации и каскада даёт избыточные FP и неточные границы.



Результат работы TerraMind (без нормализации)  
на фрагменте данных КМСС

# Модель — ResNet-101 cloud

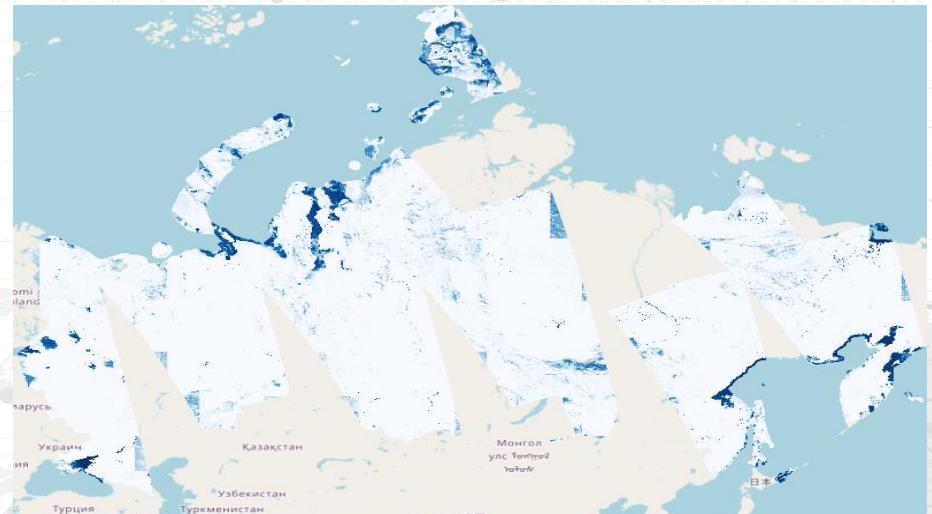
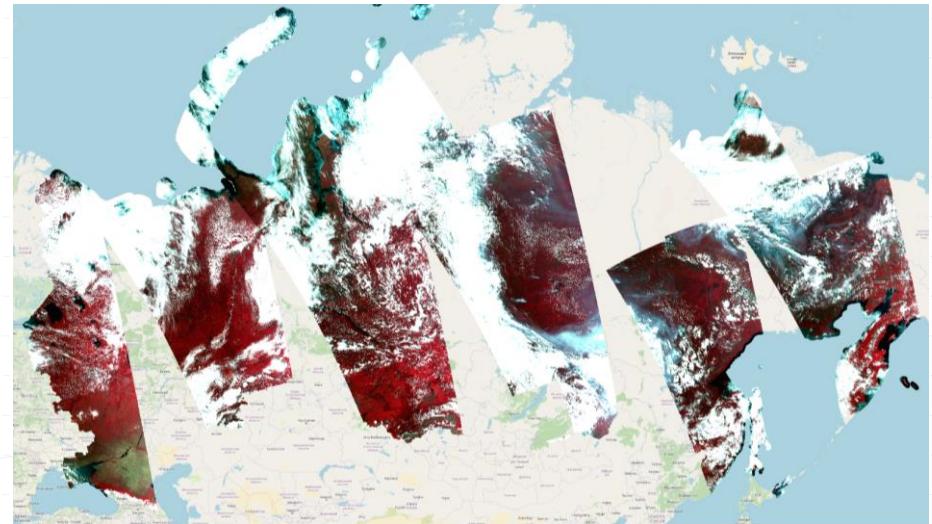
- Архитектура: **ResNet-101** (сегментация облаков).
- Данные: **ручная разметка КМСС**.
- Объём обучения:
  - 70 000 тайлов, 4 эпохи, ~12 ч.
- **Метрики**
  - Accuracy: **0.9103**
  - F1-score: **0.7888**
  - IoU: **0.7331**
- **Техпроцесс**
  - Предобработка: нормализация по квантилям.
  - Аугментации: освещённость, зеркалирование и повороты.
  - Сплиты: контроль сезонности/регионов.
- **Минусы нашего решения**
  - Генерализированная маска облачности
  - Ошибки разделения снег\вода



Результат маскирования облачности ИНС  
RESNET-101

# Модель — ResNet-101 water

- Архитектура: **ResNet-101** (сегментация водных объектов в т.ч. наводнений).
- Данные: **ручная разметка КМСС, а также данные DeepWaterMap.**
- Объём обучения:
  - **150 000 тайлов, 5 эпох, ~25 ч.**
- **Метрики**
  - Accuracy: **0.99**
  - F1-score: **0.91**
  - IoU: **0.89**
- **Техпроцесс**
  - Предобработка: нормализация по квантилям.
  - Аугментации: освещённость, зеркалирование и повороты.
  - Сплиты: контроль сезонности/регионов.
- **Минусы нашего решения**
  - Ошибки поиска небольших водных объектов



Результат маскирования водных объектов  
ИНС RESNET-101

# Ансамбль моделей

**Независимые модели:** формируют вероятностные карты для классов *cloud* и *water* на одних и тех же тайлах КМСС.

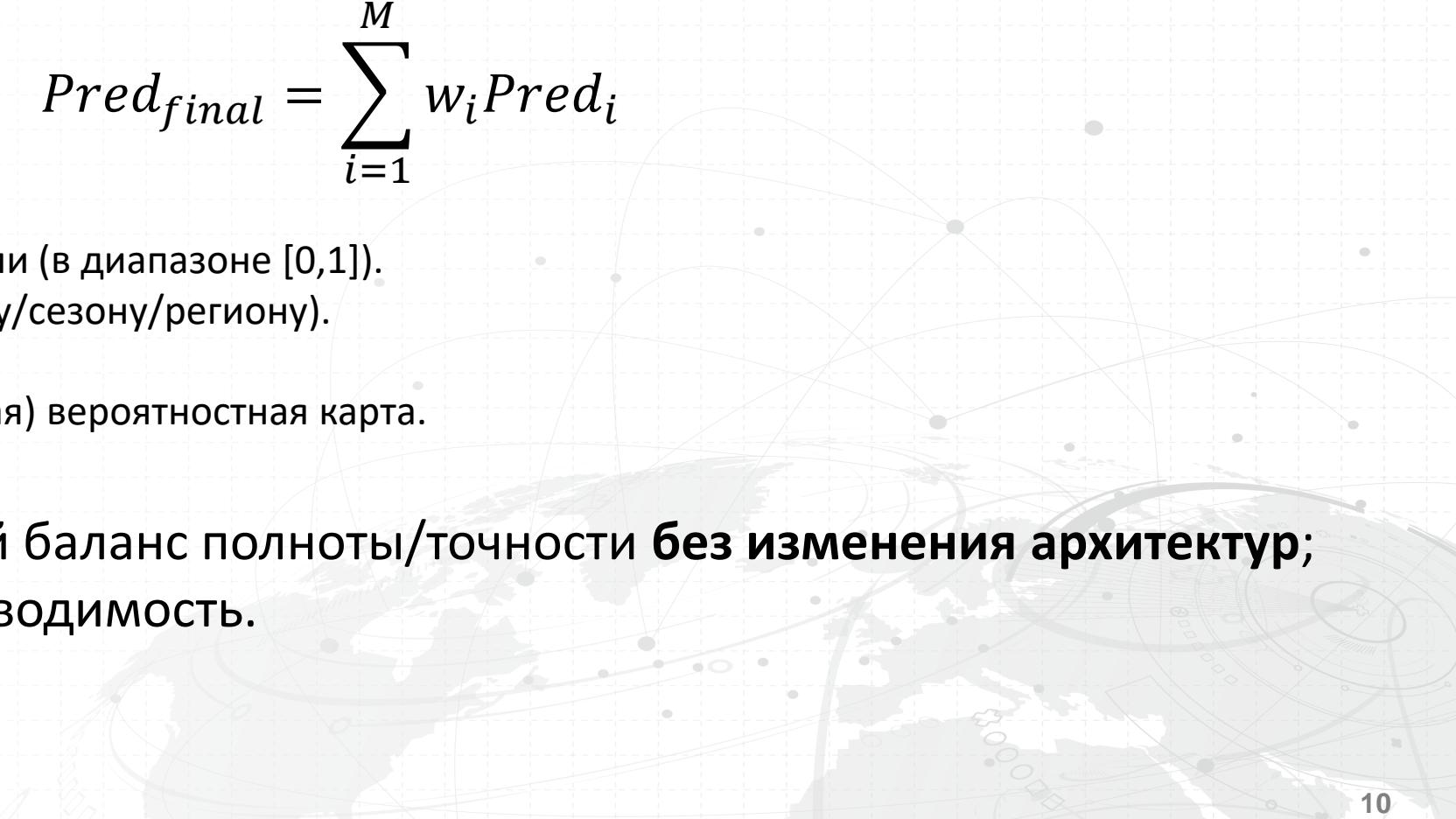
**Итоговая карта класса:** взвешенное сложение

$$Pred_{final} = \sum_{i=1}^M w_i Pred_i$$

Где:

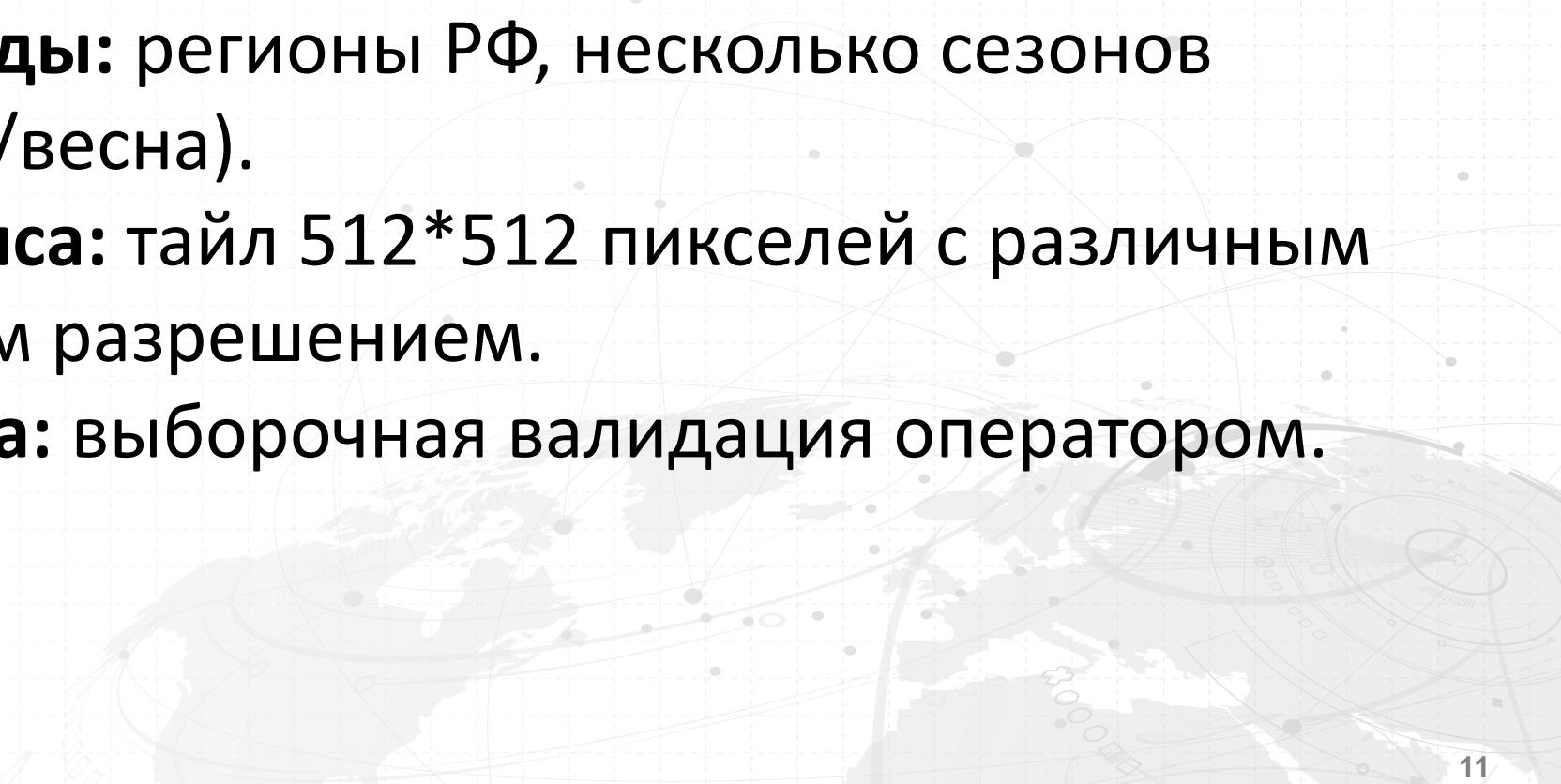
- $Pred_i$  — вероятностная карта  $i$ -й модели (в диапазоне [0,1]).
- $w_i$  — вес  $i$ -й карты (задаётся по классу/сезону/региону).
- $M$  — число карт в ансамбле.
- $Pred_{final}$  — итоговая (ансамблированная) вероятностная карта.

**Плюсы подхода:** управляемый баланс полноты/точности **без изменения архитектур**; простая настройка и воспроизводимость.

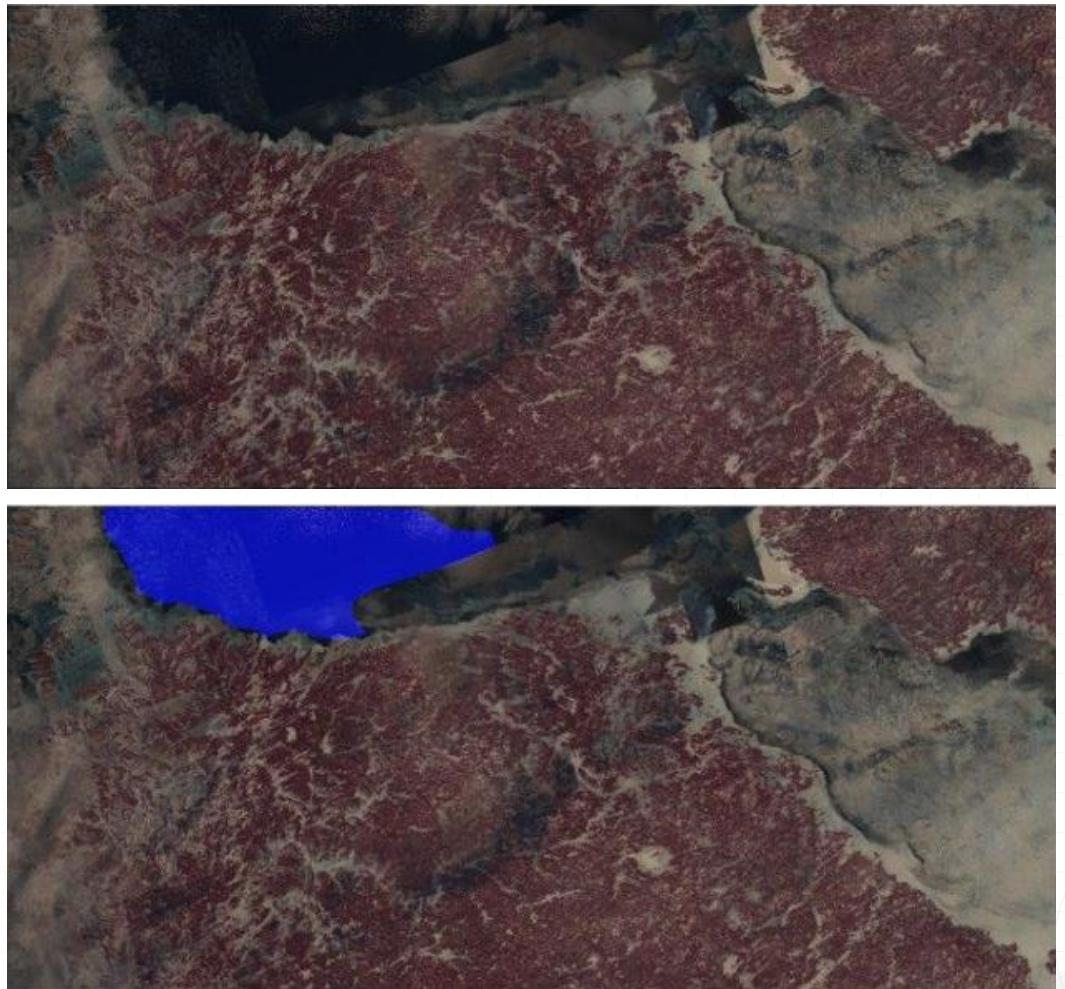


# Данные и охват эксперимента

- **Источник:** мозаики КМСС (КА «Метеор-М» №2-4), суточная съёмка.
- **География/периоды:** регионы РФ, несколько сезонов (лето/осень/зима/весна).
- **Единица инференса:** тайл 512\*512 пикселей с различным пространственным разрешением.
- **Контроль качества:** выборочная валидация оператором.



# МЕТРИКИ (ВОДА)

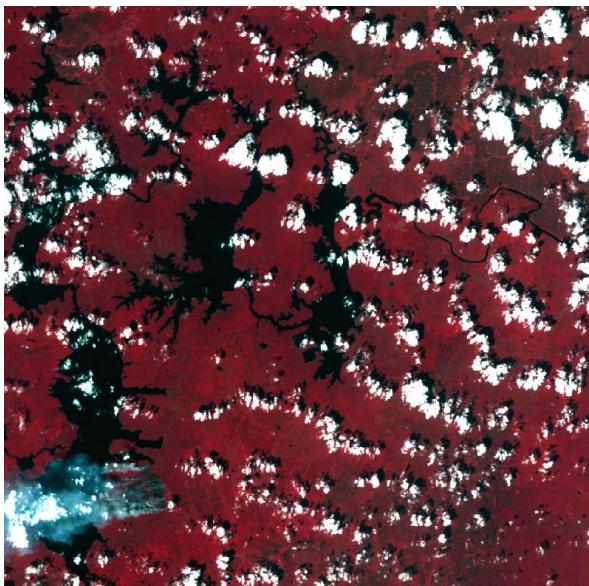


Для оценки метрик взята сложная снежная сцена

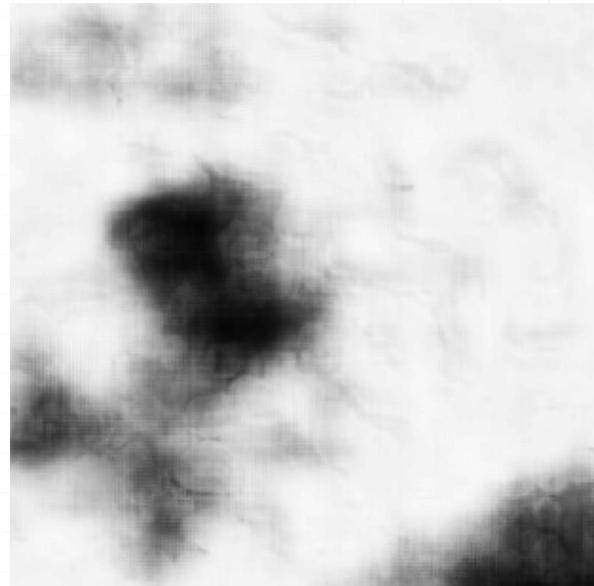
	Accuracy	F1 Score	IoU
<b>Terramind</b>	0.84	0.38	0.24
<b>ResNet101</b>	0.86	0.49	0.32
<b>ResNet101_v2</b>	0.97	0.77	0.63
<b>Ансамбль</b>	<b>0.977</b>	<b>0.80</b>	<b>0.68</b>

Важно отметить, что была взята сцена из обучающей выборки для обоих моделей ResNet!

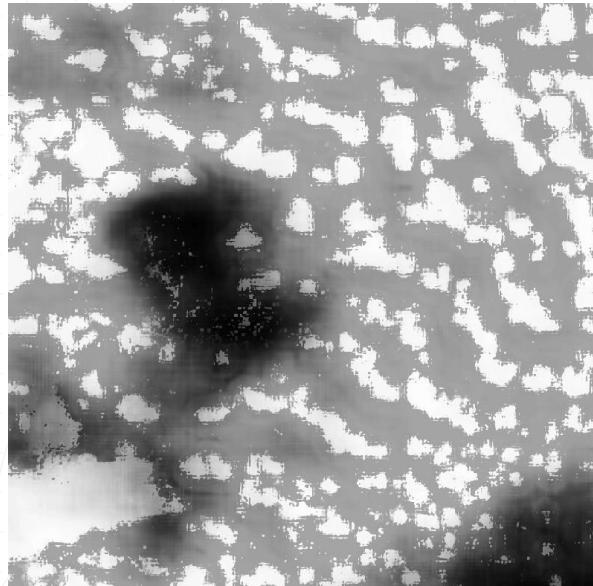
# Примеры работы сегментации облакности



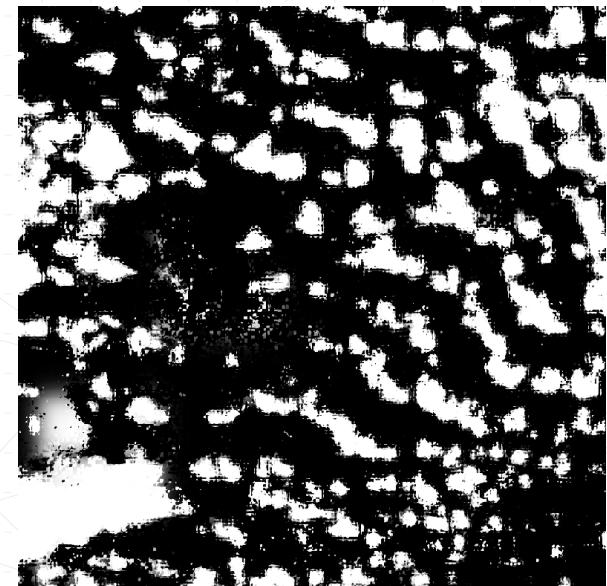
Исходный снимок КМСС  
Вилюйское  
водохранилище  
(62.924143, 110.858367)



Результат работы ИНС  
ResNet-101

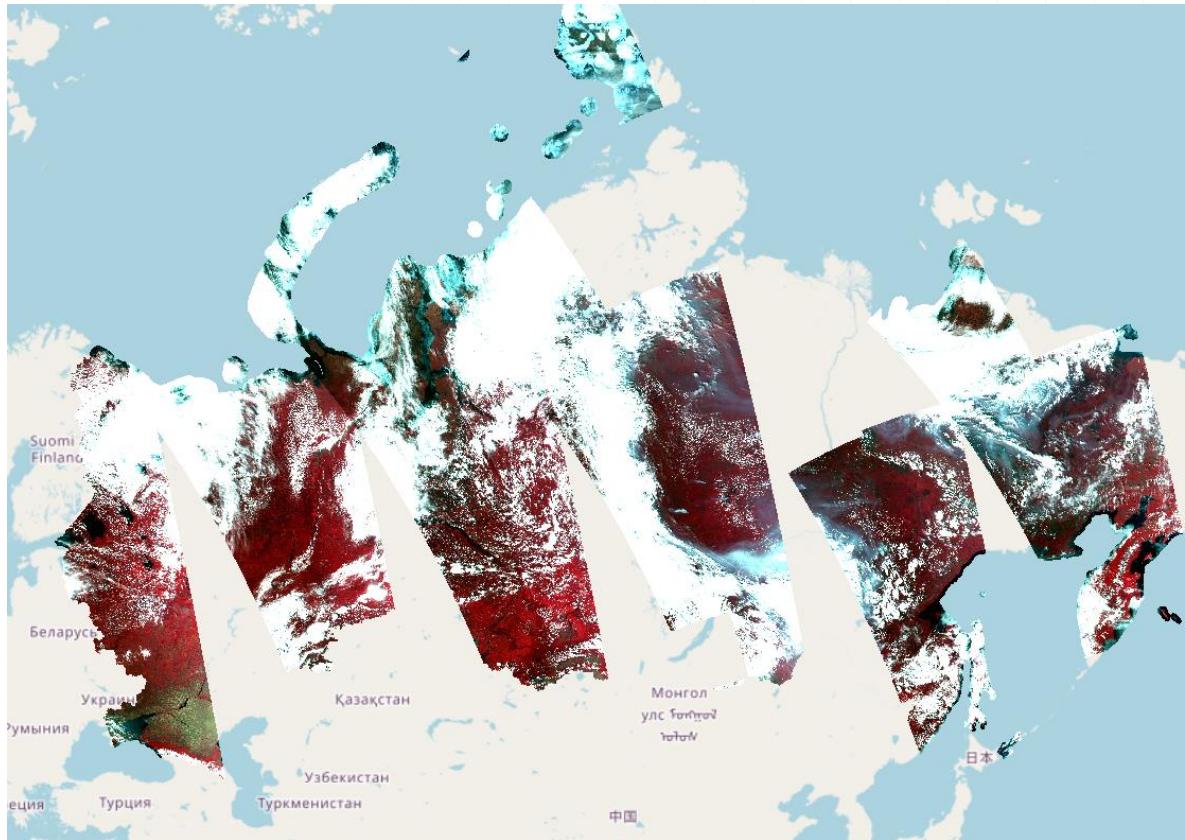


Результат работы  
TerraMind

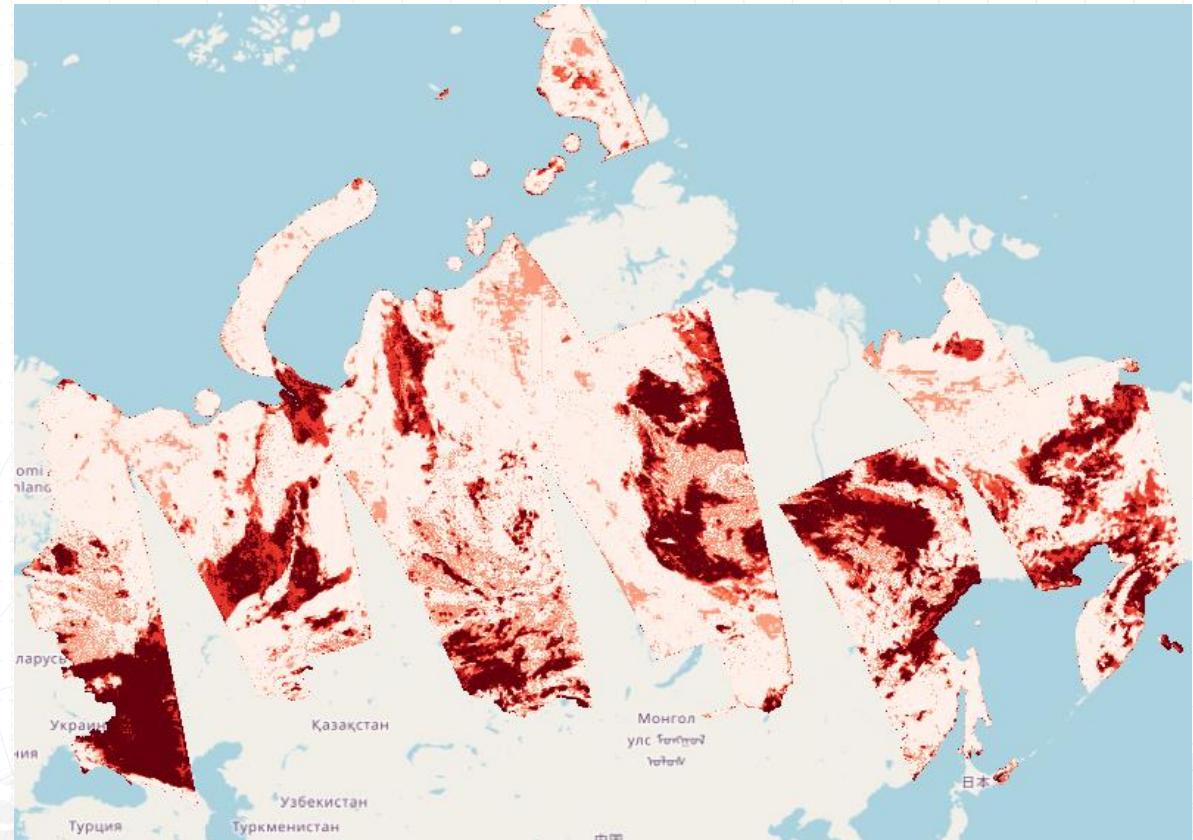


Объединённый результат  
работы ResNet и TerraMind

# Примеры работы сегментации облачности

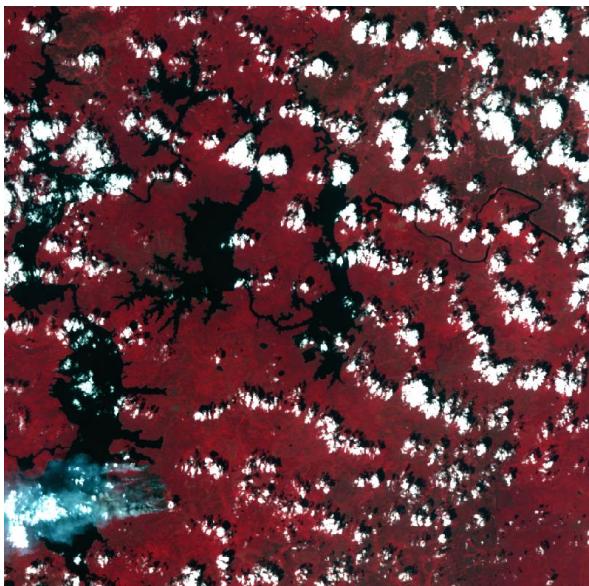


Суточная мозаика «Метеор-М» № 2-4, на  
территорию РФ (13.07.2025)

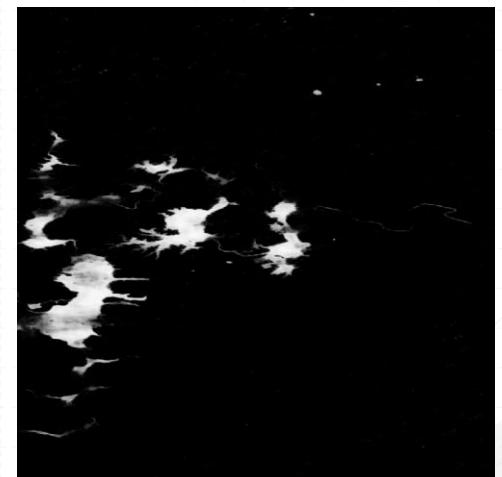
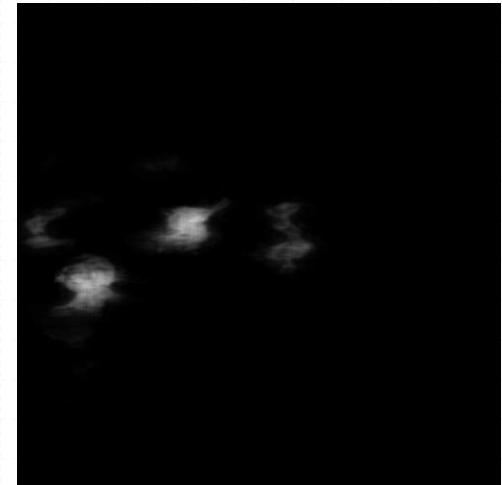


Результат маскирования облачности ансамблем  
ИНС

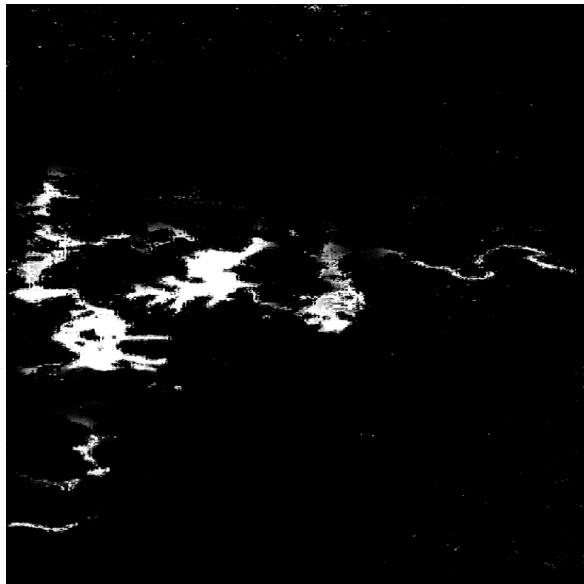
# Примеры работы сегментации воды



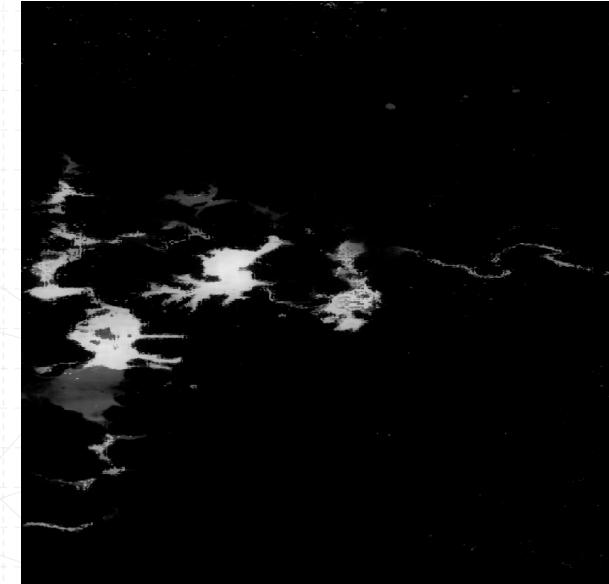
Исходный снимок КМСС  
Вилюйское  
водохранилище  
(62.924143, 110.858367)



Результат работы ИНС  
ResNet-101

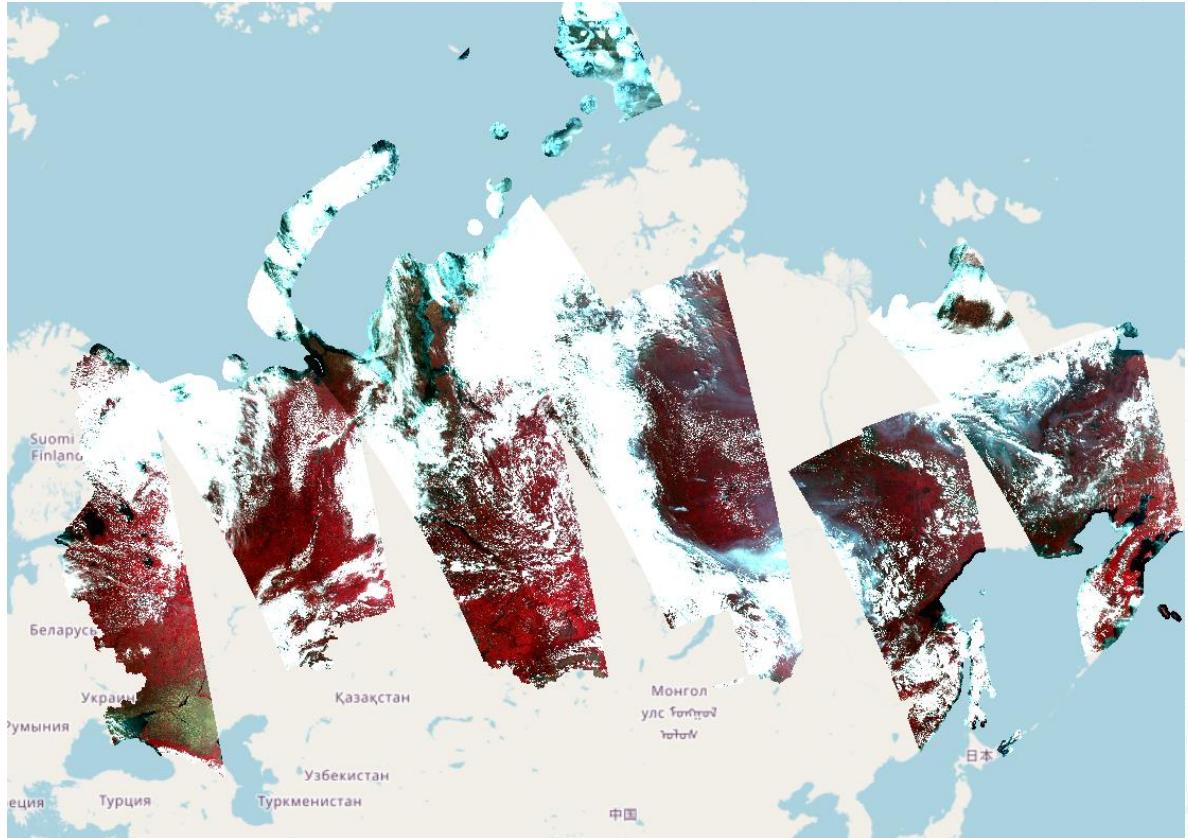


Результат работы  
TerraMind



Объединённый результат  
работы ResNet и TerraMind

# Примеры работы сегментации воды



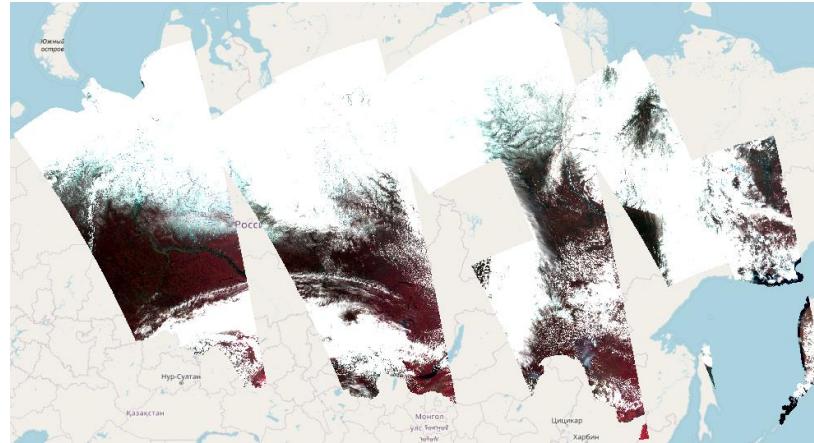
Суточная мозаика «Метеор-М» № 2-4, на  
территорию РФ (13.07.2025)



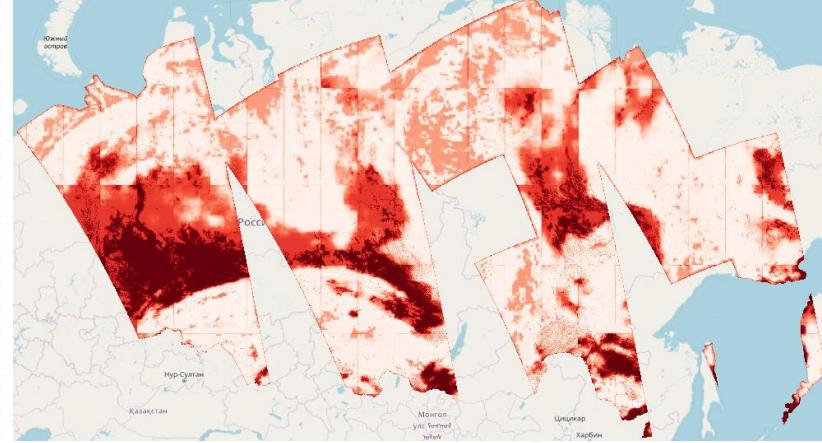
Результат маскирования воды ансамблем ИНС

# Примеры работы

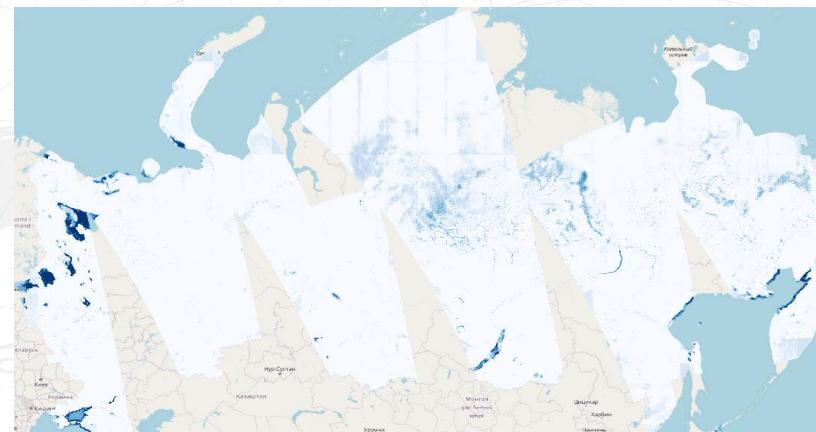
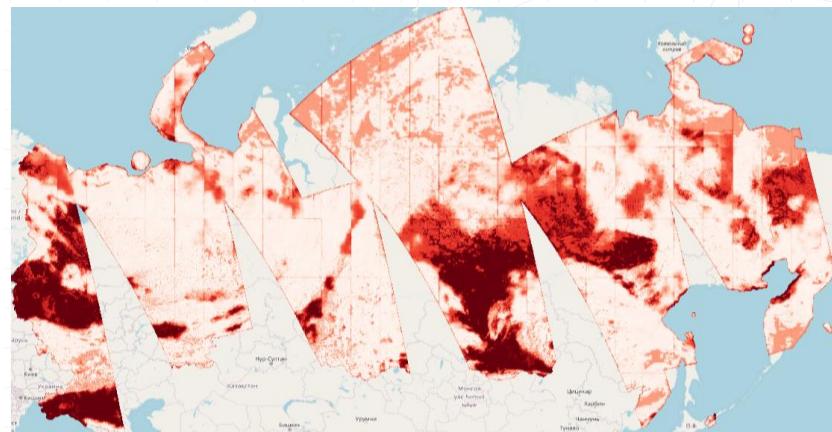
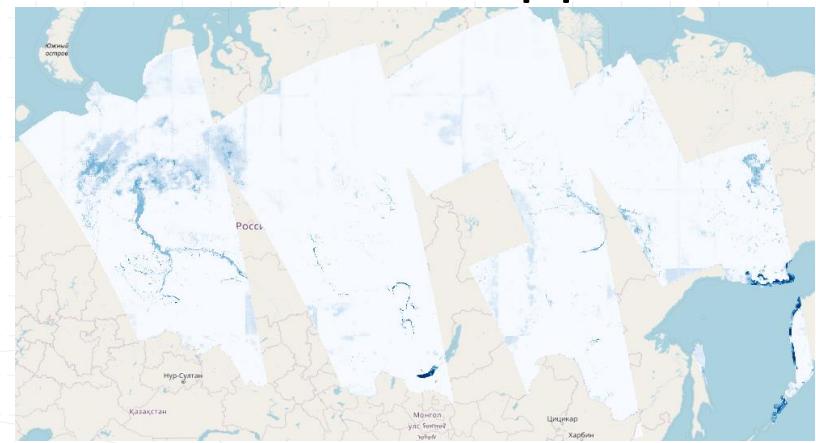
Исходная мозаика



Маска облачности

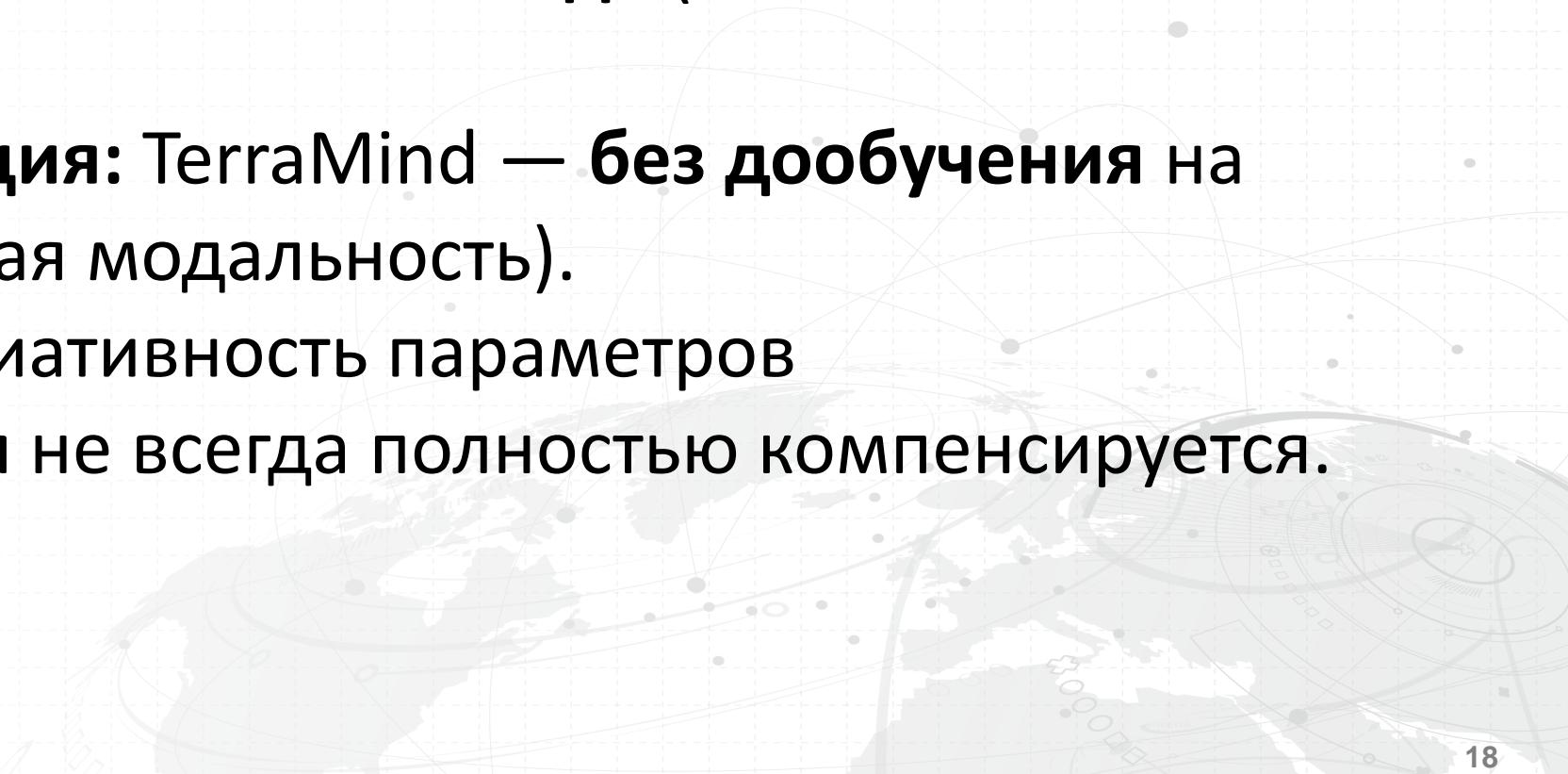


Маска воды



# Ограничения эксперимента

- **Ограниченность набора данных**, а также неоднородность по регионам/сезонам; **дисбаланс классов**.
- **Состав классов**: только **облака и вода** (без теней/снега/льда).
- **Доменная адаптация**: TerraMind — без дообучения на данных КМСС (новая модальность).
- **Радиометрия**: вариативность параметров съёмки/освещения не всегда полностью компенсируется.



# Выводы

- **Применимость:** после радиометрических и масштабных нормализаций TerraMind корректно переносится на данные КМСС.
- **Качество без дообучения:** TerraMind демонстрирует уверенное качество сегментации и может служить **базовой zero-shot моделью** для задач ДЗЗ.
- **Устойчивость:** снижено число ложноположительных срабатываний; поведение стабильнее по сезонам и регионам.
- **Практическая ценность:** повышается качество сегментации на суточных мозаиках и тематических продуктах, уменьшается объём ручной корректировки.

# Перспективы

- **Дообучение TerraMind под КМСС:** добавить поддержку NRG (NIR–Red–Green) как новой модальности и обучить под наши данные.
- **Больше классов:** включить тени, снег/лёд, считать метрики по каждому классу отдельно.
- **Новая нормализация:** разработать схему, учитывающую сезонность, угол Солнца и прочие факторы.
- **Автоподбор настроек ансамбля:** автоматически подбирать веса и пороги для регионов/сезонов по валидации.
- **Расширение охвата эксперимента:** масштабировать эксперименты с российских мозаик на глобальные покрытия.

# Заключение

Проведено применение **TerraMind** на данных **КМСС**; с реализованной радиометрической и масштабной нормализацией; собран ансамбль с нашими моделями **ResNet-101** и **TerraMind** (взвешенное сложение вероятностных карт).

## Эксперименты:

- **Zero-shot TerraMind** на КМСС (без дообучения).
- **ResNet-101** на ручной разметке КМСС для задач сегментации **воды и облачности**.
- Исследование влияния размера тайла и нормализации.
- **Ансамбль TerraMind + ResNet-101** с подбором весов и порогов по валидации.

## Результаты:

- После нормализаций **TerraMind** применим и стабилен на данных КМСС (zero-shot).
- **ResNet-101** обеспечивает высокую точность на доменных данных.
- **Ансамблирование** (взвешенная сумма) повышает итоговую точность сегментации.